

КВАЗИОПТИМАЛЬНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В СИСТЕМАХ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ЛЮКАЦИИ АТМОСФЕРЫ

Одним из возможных способов повышения отношения сигнал/шум в системах акустooптической локации можно назвать применение различного рода фильтрации рассеянного оптического сигнала.

В бистатистической схеме системы сигнал обладает ярко выраженной пространственной структурой, обусловленной гармонической акустической волной, поэтому возможно эффективное использование пространственной фильтрации.

Рассеянный сигнал акустooптического взаимодействия в бистатистической системе на элементарной площадке в плоскости изображения имеет вид:

$$s(x, y, t) = A_s \cdot \cos \left(\omega \cdot t - \frac{k}{\sin(\theta)} \cdot x + \varphi_0 \right) dx dy, \quad (1)$$

где A_s – амплитуда сигнала в плоскости изображения, которая зависит от сечения взаимодействия Y_s и угла θ : $A_s = Y_s / \sin(\theta)$; θ – угол между направлением распространения зондирующих волн и осью приемной антенны; ω , k , φ – параметры акустической волны

Постоянная составляющая сигнала рассеяния, которая действует как фон, определяется следующим образом:

$$n(x, y) = A_n dx dy, \quad (2)$$

где A_n – амплитуда фона в плоскости изображения, которая зависит от сечения взаимодействия Y_n и угла θ : $A_n = Y_n / \sin(\theta)$.

Начало координат расположено в центре плоскости изображения (рис. 1). Для простоты линейное оптическое увеличение приемной системы взято равным 1. Любое другое значение оптического увеличения повлияет на пределы интегрирования в формулах, на амплитуду сигнала элементарной площадки в плоскости изображения, но не изменит собственно результатов интегрирования. Направление оси абсцисс совпадает с направлением распространения акустической волны. Ширина оптического луча – b , толщина видимого рассеивающего слоя – L .

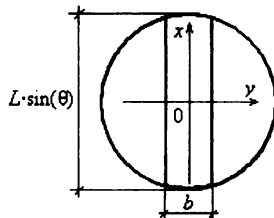


Рис. 1. Плоскость изображения

При обычном интегрировании сигнала по всему полю изображения получаем результат

$$s_{\Sigma}(t) = Y_i \cdot b \cdot \frac{2}{k} \cdot \sin\left(\frac{k \cdot L}{2}\right) \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0). \quad (3)$$

Интегральный сигнал постоянной составляющей

$$n_{\Sigma} = Y_n \cdot b \cdot L.$$

Таким образом, отношение амплитуды переменной составляющей и среднего уровня фона в приемнике без применения пространственного фильтра составляет

$$Q = \left| \frac{Y_i}{Y_n} \cdot \frac{2}{k \cdot L} \cdot \sin\left(\frac{k \cdot L}{2}\right) \right|. \quad (4)$$

Это отношение уменьшается с ростом толщины видимого слоя L , т.е. простое пространственное усреднение сигнала невозможно.

Оптимальный пространственный фильтр служит для решения задачи обнаружения сигнала на фоне помех. Его частотная характеристика при максимизации отношения сигнал/помеха может быть найдена следующим образом

$$H(j\omega_n) = A_{\Phi} \frac{S^*(j\omega_n)}{\Phi_{\omega}(\omega_n)} \cdot \exp(-j\omega_n \cdot x_0), \quad (5)$$

где A_{Φ} – некоторая постоянная; $S^*(j\omega_n)$ – функция, комплексно-сопряженная с пространственным спектром сигнала; $\Phi_{\omega}(\omega_n)$ – спектральная плотность помехи; x_0 – фазовый сдвиг выходного сигнала; ω_n – пространственная частота.

Фазовый сдвиг для пространственного фильтра удобно выбирать нулевым. В задаче акустооптической локации наибольшее значение в виде помехи измерения имеет постоянный уровень рассеяния, т.е.

$$\Phi_{\omega}(\omega_n) = \begin{cases} \Phi_0, & \omega_n = 0, \\ 0, & \omega_n \neq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Это означает, что фактически на всех частотах кроме нулевой частоты шум отсутствует, и частотная характеристика согласованного фильтра должна иметь вид:

$$H(j\omega_n) = A_{\Phi} S^*(j\omega_n). \quad (7)$$

Отсюда коэффициент пропускания согласованного пространственного фильтра в плоскости изображения будет иметь вид

$$h(x, y) = A_h \cdot \cos\left(\frac{k}{\sin(\theta)} \cdot x\right). \quad (8)$$

Если рассматривать практическую реализацию пространственного фильтра, то следует отметить, что получение коэффициента пропускания в виде (8) при работе с некогерентными оптическими сигналами не представляется возможным, т.к. коэффициент пропускания принимает отрицательные значения. Обычно эта проблема решается использованием вычета электрических сигналов после преобразования при детектировании света

многоэлементным приемником. Вместо плавных переходов коэффициента пропускания фильтра используют резкий переход от полностью прозрачного к непрозрачному. Для подавления постоянного фона сумма весов элементов фильтра должна быть равна 0. Пример квазиоптимального пространственного фильтра в системе акустооптической локации представлен на рис. 2.

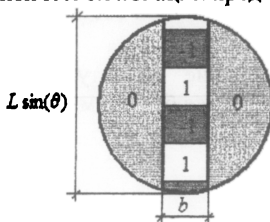


Рис. 2. Квазиоптимальный фильтр в системе акустооптической локации.
На плоскости изображения указаны весовые коэффициенты

Коэффициент пропускания квазиоптимального фильтра в плоскости изображения имеет вид:

$$h(x, y) = \begin{cases} A_h, -\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}, 2 \cdot i \cdot \pi \leq \frac{x \cdot k}{\sin(\theta)} \leq \pi + 2 \cdot i \cdot \pi, \\ -A_h, -\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}, -\pi + 2 \cdot j \cdot \pi < \frac{x \cdot k}{\sin(\theta)} < 2 \cdot j \cdot \pi, \\ 0, y > \frac{b}{2} \text{ или } y < -\frac{b}{2}, \end{cases} \quad (9)$$

где i и j – целые числа.

Линейные размеры элементов пространственного фильтра по осям x и y для любого значения линейного оптического увеличения приемной системы

$\beta_{\text{опт}}$ равны соответственно $X_\phi = |\beta_{\text{опт}}| \cdot \frac{\lambda \cdot \sin(\theta)}{2}$, $Y_\phi = |\beta_{\text{опт}}| \cdot b$.

Исследуем сигнал на выходе этого фильтра, получим

$$s_\Sigma(t) = Y_s \cdot A_h \cdot b \cdot \frac{2 \cdot L}{\pi} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0). \quad (10)$$

Фоновая составляющая на выходе фильтра $n_\Sigma = 0$.

Легко показать, что если число длин волн λ_1 , которые укладываются в толщину видимого слоя L , равно a , то сигнал на выходе всего фильтра (9) при длине волны в области взаимодействия λ_2 равен

$$s_\Sigma(t) = Y_s A_h b \frac{2}{k_2} \sum_{m=0}^{a-1} \left((-1)^m \left(\cos\left(\frac{m\pi k_2}{k_1}\right) - \cos\left(\frac{(m+1)\pi k_2}{k_1}\right) \right) \right) \sin(\omega \cdot t + \varphi_{02}). \quad (11)$$

Из выражений (11) и (10) можно получить нормированную амплитудно-частотную характеристику квазиоптимального пространственного фильтра

$$A_{\text{нф}}(k_2/k_1) = \frac{k_1}{2k_2 \cdot a} \left| \sum_{m=0}^{a-1} \left((-1)^m \left(\cos\left(\frac{m\pi k_2}{k_1}\right) - \cos\left(\frac{(m+1)\pi k_2}{k_1}\right) \right) \right) \right|. \quad (12)$$

Роль нормированной пространственной частоты здесь выполняет нормированное волновое число. Графики амплитудно-частотных характеристик при различных значениях параметра a приведены на рис. 3.

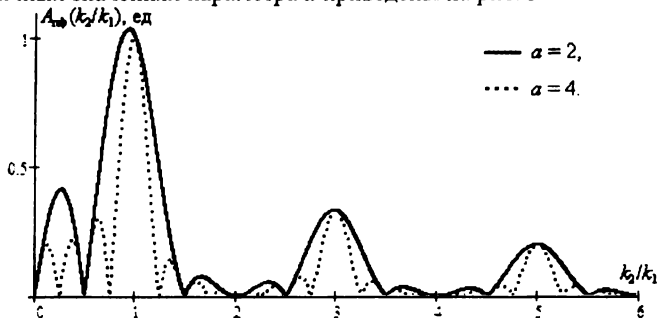


Рис. 3. Графики нормированной амплитудно-частотной характеристики (по пространственной частоте) квазиоптимального фильтра

Максимум АЧХ (12) достигается в точке $k_2/k_1=1$ при больших значениях параметра a , т.е. когда в видимый фотоприемником рассеивающий слой укладывается много длин волн акустического излучения и фильтр состоит из множества ячеек.

В общем случае величина a может быть не целой, т.е. крайние элементы фильтра имеют линейные размеры, соответствующие значениям менее $\lambda_1/2$. Параметр a можно представить в виде $a = a_u + a_d$, т.е. как сумму целой и дробной части. Тогда нормированная амплитудно-частотная характеристика может быть представлена как непрерывная функция параметра $a > 0$

$$A_{\text{нф}}(k_2/k_1, a) = \frac{k_1}{2k_2 \cdot a} \left| \sum_{m=0}^{a_u-1} \left((-1)^m \left(\cos\left(\frac{m\pi k_2}{k_1}\right) - \cos\left(\frac{(m+1)\pi k_2}{k_1}\right) \right) \right) \right| + \quad (13)$$

$$+ (-1)^{a_u} \left| \cos\left(\frac{a_u \pi k_2}{k_1}\right) - \cos\left(\frac{a \pi k_2}{k_1}\right) \right|.$$

Величину $a/2$ можно назвать порядком пространственного фильтра. Этот порядок в общем случае может быть дробным.

Рассмотрим влияние изменения длины волны на выходной сигнал. Главным источником этих изменений в атмосфере является температура. Диапазон температур атмосферы, в котором должна работать система, например в составе средств метеобеспечения аэропорта от -70 до $+50$ °С средняя геометрическая температура по абсолютной шкале составляет -17 °С. Для значений $a/2 = 1; 2; 3$ максимумы АЧХ приходятся соответственно на абсциссы $k_2/k_1 = 0.928; 0.981; 0.992$. Параметры фильтра выбираются так, чтобы

нормированное волновое число, соответствующее средней геометрической температуре в диапазоне, совпадало с указанными абсциссами. Тогда амплитуда выходного сигнала во всем диапазоне температур ухудшается не более чем на 8.8%; 33%; 65% за счет изменения пропускания фильтра для соответствующего значения параметра $a/2$ (порядка фильтра). Если параметры пространственного фильтра и частота излучаемой акустической волны постоянны, то следует выбирать $a/2 < 5$, иначе амплитуда выходного сигнала в указанном температурном диапазоне может уменьшиться до нуля.

Из-за того, что в согласованном квазиоптимальном фильтре с коэффициентом пропускания (9) фон подавляется в электронной части схемы, шум, обусловленный фоном, не исключается. Однако в значительной степени увеличивается амплитуда сигнала

$$Q_c = \left| \frac{L \cdot k \cdot A_{\text{нф}}(k/k_0, L \cdot k_0/\pi)}{\pi \cdot \sin\left(\frac{k \cdot L}{2}\right)} \right|, \quad (14)$$

где k_0 – волновое число акустической волны, на которую рассчитан фильтр.

Таким образом, отношение сигнал/шум увеличивается в Q_c^2 раз, а среднее квадратичное отклонение однократного измерения температуры уменьшается в Q_c раз.

Если пространственное разрешение, которое определяется толщиной слоя L , фиксировано, то выигрыш Q_c (при рациональном выборе частоты акустического зондирования без фильтра $f_{\text{опт}}$) будет равен 1. Однако оптимальная частота $f_{\text{фонт}}$ акустического излучения с использованием квазиоптимального пространственного фильтра будет равна

$$f_{\text{фонт}} = a \cdot f_{\text{опт}}. \quad (15)$$

Соответственно для фильтра из 4 элементов оптимальная акустическая частота будет в 4 раза больше, чем без использования фильтра.

При постоянном отношении сигнал/шум использование более высокой акустической частоты дает значительные преимущества. Во-первых, точность измерения температуры в системе акустооптической локации как для импульсного, так и для фазового методов увеличивается с ростом частоты. В фазовом методе при использовании фильтра возможно эффективное применение многочастотного измерения. Во-вторых, акустические источники большей частоты при фиксированном диаметре излучающей антенны имеют более узкую диаграмму направленности, поэтому повышение частоты позволяет снизить энергетические затраты системы.

Полученный квазиоптимальный пространственный фильтр с нормированной амплитудно-частотной характеристикой (13), который имеет простую конструкцию, легко реализуемую с помощью многоэлементных фотоприемников, увеличивает полезный сигнал в Q_c раз (14), либо,

если пространственное разрешение фиксировано, позволяет повысить точность измерения температуры в системе акустической локации и улучшить ее энергетические параметры за счет эффективного применения более высокой акустической частоты при зондировании.